

DOI: 10.20103/j.stxb.202308031660

刘明欣, 王彤, 闫甲祺, 刘于琪, 赵渺希. 城市社区尺度花粉致敏风险评估方法研究进展. 生态学报, 2024, 44(11): 4449-4464.

Liu M X, Wang T, Yan J Q, Liu Y Q, Zhao M X. Research progress on pollen-allergy risk assessment methods at the urban community scale. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4449-4464.

城市社区尺度花粉致敏风险评估方法研究进展

刘明欣^{1,2}, 王彤¹, 闫甲祺¹, 刘于琪^{3,4,*}, 赵渺希^{3,4}

1 华南理工大学建筑学院风景园林系, 广州 510641

2 广州市景观建筑重点实验室, 广州 510641

3 华南理工大学建筑学院城市规划系, 广州 510641

4 华南理工大学亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广州 510641

摘要: 目前, 花粉过敏性疾病在国内外城市中均具有较高发病率。作为城市居民生活的基本单元, 社区对居民健康有重要的影响。因此, 社区尺度的花粉致敏风险评估研究是提升居民健康的重要抓手。鉴于此, 研究从花粉产生的植物本体角度和影响花粉传播的空间环境角度系统地综述了影响社区花粉致敏风险的相关因素, 并进一步梳理了花粉致敏风险的评估方法。研究发现: 在空间尺度上, 目前国内外评估花粉致敏风险相关方法主要应用于微观的植物尺度与宏观的城市尺度, 在中观尺度的应用仅局限于校园、公园中的绿地, 尚未对社区进行研究; 在评估因素上, 现有评估方法多关注植物自身因素, 如树木高度、冠幅等因素, 而较少涉及诸如通风、温湿度等环境因素; 然而社区中环境条件复杂, 建筑环境不容忽视, 因此了解植物与环境的综合作用对于社区花粉致敏风险的评估至关重要。基于上述发现, 提出未来建立适宜社区尺度的致敏评估方法的可能途径: 首先应建立适用于评估社区常用植物的统一标准数据集, 在综合考虑植物因子、社区环境因子和临床患病率等各类因子的基础上建立社区花粉致敏风险评估方法, 还可利用可视化技术建立包含社区三维特征的模型来模拟社区花粉分布及扩散规律, 确立社区尺度下花粉致敏风险评估方法, 降低社区花粉致病率, 进一步提升居民健康水平。

关键词: 城市社区; 花粉致敏风险; 评估方法; 影响因素

Research progress on pollen-allergy risk assessment methods at the urban community scale

LIU Mingxin^{1,2}, WANG Tong¹, YAN Jiaqi¹, LIU Yuqi^{3,4,*}, ZHAO Miaoxi^{3,4}

1 Department of Landscape Architecture, School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

2 Guangzhou Municipal Key Laboratory of Landscape Architecture, Guangzhou 510641, China

3 Department of Urban Planning, School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

4 State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract: There has been an increasing incidence of pollen allergic diseases in cities around the world. As a fundamental unit of a city, community has an important impact on residents' health. Therefore, pollen-allergy risk assessment at community scale is significant to reduce pollen-allergy symptoms and improve health among residents. Therefore, this study reviewed relevant factors affecting pollen-allergy risk in communities from the perspectives of pollen-producing plant ontogeny and of the spatial environment affecting pollen dispersal. It further sorted out the assessment methods of pollen-allergy risk. Research findings indicated that the existing studies did not apply pollen-allergy risk assessment methods at mesoscale, especially urban communities, while focused on the microscale (i.e., plant scale) and the macroscale (i.e.,

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目 (2021A1515012061)

收稿日期: 2023-08-03; **网络出版日期:** 2024-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyuqi@scut.edu.cn

city scale). In addition, in terms of factors affecting the risk of pollen-allergy, most existing methods were concerned with plant factors, such as the height and crown width of a plant, and few of them considered the environmental factors, including wind environment, temperature, humidity, etc. Finally, there were various architecture landscapes inside a community. Thus, understanding the interaction between plants and built environment was essential for pollen-allergy risk assessment at community scale. Based on these findings, we provided suggestions to develop pollen-allergy risk assessment at community scale. Firstly, we should develop a standardized dataset providing information about common plants in communities, and establish a pollen-allergy risk assessment method at community scale based on the evaluation of plants, community built environment, and clinical prevalence of pollen-allergy diseases. Secondly, we should build community three-dimension models to simulate pollen distribution and dispersal with visualization techniques, which contributes to reducing the morbidity of pollen-induced allergic diseases and improving health status of urban residents.

Key Words: urban communities; pollen-allergy risk; assessment methods; influence factor

致敏性花粉在空气中传播会使具有特应性体质的人群出现花粉症,诱发过敏性鼻炎、过敏性哮喘等过敏性疾病^[1-2]。空气中的花粉浓度越高,花粉相关致敏症状越严重^[3-4],严重影响了患者的身体健康和生活质量^[5]。近年,致敏性花粉导致的过敏性疾病患病率呈持续上升趋势。在我国,过敏性鼻炎患病率由 2005 年的 11.1% 上升到 2022 年的 17.6%,花粉是其中常见过敏原的主要来源之一^[1]。在我国北方,花粉导致的变应性鼻炎确诊患病率在 10.5% 至 31.4% 之间^[1]。美国花粉过敏暴露引起的过敏性鼻炎每年影响 6000 万人,在美国每年的医药费用超过 30 亿美元^[6]。值得注意的是,城市里因致敏性花粉导致的过敏性疾病患病人口比例显著高于农村^[1,7-9]。同时,由于全球气候变化、建筑密度高和致敏性植物广泛种植等原因^[10-12],预计未来城市居民罹患花粉症而导致过敏性疾病的风险将持续增加。作为城市生活空间的基本单元,社区既是致敏风险产生最直接的第一场所,也是风险后果最长期的承担者,更是风险管理的最有效参与者。从花粉致敏风险产生的阶段看,多项研究证实居住在致敏树种附近会导致更高的致敏概率^[13-15],因此居民日常生活的社区中的致敏植物对居民过敏性疾病的影响更大。从花粉致敏风险持续作用的过程看,由于社区是人们长期居住停留的场所,当社区致敏植物较多时,将会使居民长期暴露于高浓度花粉环境中。特别是社区通风较差会导致花粉积聚,进一步延长居民暴露于致敏花粉环境中的时间,从而加剧过敏症状^[16]。从花粉致敏风险的管理看,社区尺度的花粉治理是最易行且最有效的,具有空间设计与改造上的可模拟性与可操作性^[17]。因此,研究城市社区中花粉致敏的风险因素,对花粉致敏风险进行科学评估,可降低居民花粉症的患病率,从而提升社区居民的身体健康和生活质量,营造健康社区,推动健康中国战略的有效实施。

目前,国内外评估花粉致敏风险相关方法以应用于植物^[18-21]及城市^[22-23]尺度为主,尚未对社区进行研究。植物致敏风险评估是对花粉产生源头的个体植物进行致敏风险进行评估。Cariñanos 等对地中海城市 150 种植物的致敏性程度进行了评估^[19]。国内辛嘉楠等综述了花粉致敏植物的种类、物候特征和影响因素,进而提出了控制花粉致敏植物的建议。Pecero-Casimiro 在城市尺度下,结合 LiDAR 等技术,将影响花粉传播过程的空间因素纳入评估计算中^[22]。张曼琳等通过构建花粉浓度及花粉致敏危害潜力计算公式,评估深圳市花粉致敏危害潜力及其分布特点^[3]。花粉致敏风险的评估在中观尺度的应用局限于校园、公园中的绿地^[24-26],缺少对建筑等环境因素的考虑。近年来,陈颖等人对街谷中的典型建筑布局和植物配置模式对花粉飞散特征的影响进行了模拟研究,进一步结合花粉传播的空间影响因素,分析评估环境对花粉致敏性的影响^[27]。总体而言,现有评估方法多关注植物自身因素,如树木高度、冠幅等因素^[26,28],而较少涉及诸如通风、温湿度等环境因素。因此,基于植物、公共绿地和城市尺度的评估方法不能直接用于评估城市社区花粉致敏风险,亟需开展有关城市社区的花粉致敏风险预测和评估研究。基于上述背景,本文从植物和社区环境两个角度对城市社区中花粉致敏风险因素进行总结,并结合已有的各类花粉致敏风险评估方法进行分类评述,总结目前城市社区花粉致敏风险评估的难点及问题,进而提出对未来研究方向的一些思考,以期对花粉过敏性

疾病的预防管控、推动健康城市建设提供参考。

1 城市社区花粉致敏风险的影响因素

理解社区花粉致敏风险的影响因素,有助于建立高效可靠和系统的花粉致敏风险评估方法。从城市社区对居民健康的影响来看,社区环境通过影响花粉的产生或传播,从而影响居民健康水平^[29]。城市社区花粉致敏风险的影响因素可划分为植物因素和环境因素两个方面(图 1)。

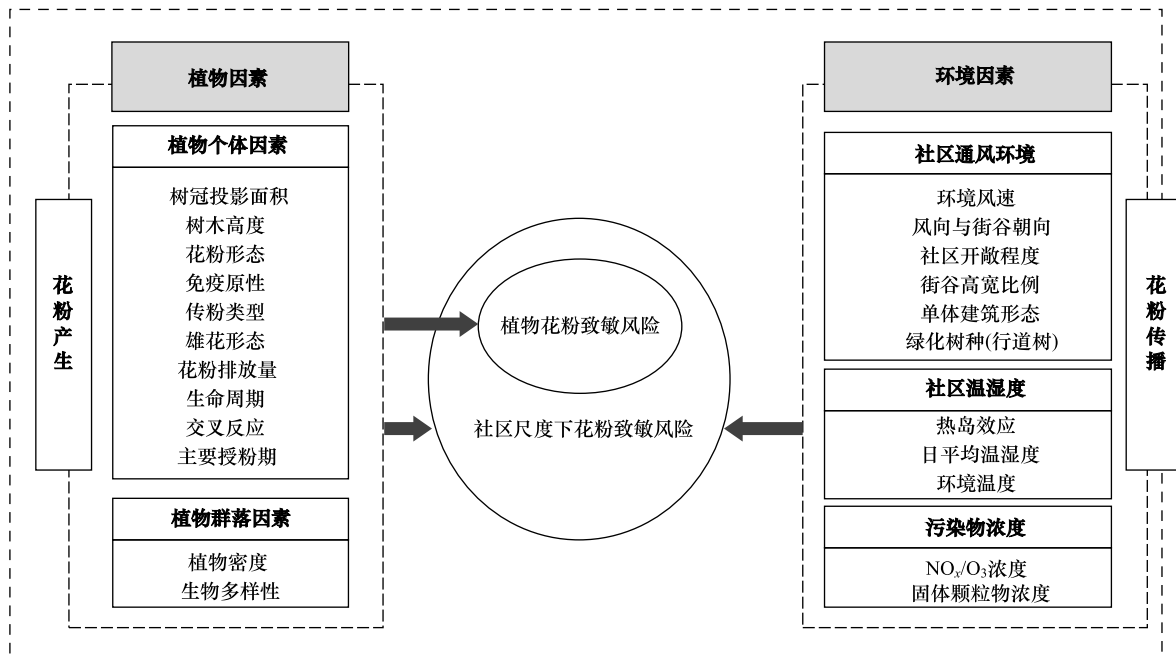


图 1 影响城市社区中花粉致敏风险的因素

Fig.1 Factors affecting pollen-allergy risk in urban communities

1.1 植物因素对城市社区花粉致敏风险的影响

作为花粉的来源,植物的个体特性和群落配置方式均直接影响城市社区花粉浓度^[30—31],二者是致敏植物花粉产生的主要影响因素,是进行城市社区花粉致敏评估的关键要素^[30—31](表 1)。

1.1.1 植物个体是花粉的直接来源

植物的花粉类型、树冠形态、性别、雄花形态、授粉期长度和植物之间的交叉反应会影响植物个体花粉的产生。首先,植物产生的花粉粒是花粉症的直接诱因。表面光滑的花粉粒相较于表面有凸起的花粉颗粒具有更强的致敏性^[15]。植物的传粉类型主要为风媒和虫媒,风媒传粉植物通常具有较高的致敏风险,而虫媒植物由于空气中花粉浓度较低,对人体致敏率明显低于风媒植物^[10,26]。第二,植物个体的树冠形态直接影响社区的花粉浓度^[32]。树冠的体积大小往往与花粉释放量密切相关,较大的树冠每单位表面积有更多的枝条、花朵和雄蕊^[33]。唐雨倩的研究表明,行道树的平均冠幅越大、平均树高越高,街道的花粉致敏风险就越高^[34]。

第三,植物个体的性别会影响花粉的排放量。雄性树株结出的雄花是植物花粉的主要来源。然而,由于雌性树株结出的果实增加清洁难度且易导致路面打滑,许多城市在选择行道树时均优先选择雄性树种^[20]。例如,荷兰榆树病在北美造成数百万棵榆树死亡后,美国农业部建议使用雄性白蜡树和枫树来代替枯死的榆树,却大大增加了城市中花粉的排放量^[35—36]。同时,Thompson 等指出雄花形态也会影响花粉致敏风险,如果花药伸出花的保护结构外,花粉释放到空气中的可能性就会增加^[37]。第四,植物个体的主要授粉期长度会影响社区中花粉浓度。植物的主要授粉期是指从花粉年累积总量的 5% 到 95% 的时期。García-Mozo 等指出当两个物种具有相似的致敏潜力时,授粉期较长的物种引发过敏症状的时间也较长^[38]。

第五,植物个体间的交叉反应会导致城市社区中的花粉过敏患病率增加。人体免疫系统对于所吸入花粉粒产生过敏反应是由蛋白质类的过敏原导致的。如果花粉粒外壁上存在序列和结构相似的蛋白质,会引发人体对不同花粉之间的免疫学交叉反应,从而增加了花粉过敏病症患病人数^[39]。例如豚草花粉与我国广泛分布的致敏植物蒿属的花粉间存在交叉抗原^[40];桦树花粉与白蜡树的花粉存在交叉抗原^[41];棕榈科的槟榔、扇叶糖棕、椰子以及海枣花粉是潜在的过敏原,并且有很强的交叉反应过敏性^[42]。

1.1.2 植物群落配置方式与花粉总量

植物的群落特征会对花粉致敏风险造成较大影响。对于一个既定地块,植物的种植密度会显著影响环境中的花粉浓度,从而影响场地的致敏风险。Cariñanos 等指出大规模集中栽植低致敏性的树种也可能产生较高的致敏风险^[10]。2019 年 Cariñanos 进一步指出,具有较高致敏风险的公园,其树木种植密度都在 150 棵/hm²以上,公园绿地的致敏风险与致敏树种数量有着较强的关系^[24]。国内研究也指出致敏树种占比是决定绿地花粉致敏风险的重要因素^[43]。城市绿地通常出现杨树、柳树、柏树和棕榈树等致敏植物大量种植的现象。这些物种会在主要花粉季节同时向空气中释放大量花粉^[10]。例如北京市郊因大量种植高致敏的杨树作为城市防沙林而引发较高的花粉过敏症发病率^[44]。

作为植物群落的另一关键性参数,树种多样性对环境致敏风险也有较大影响^[45]。城市中植物物种多样性低会导致花粉大量集中释放。例如,城市中树种统一的行道树产生了大量单向花粉,且这些花粉不能快速地扩散,导致城市中花粉过敏率的升高^[10]。Cariñanos 等和 Sousa-Silva 等分别对致敏潜力与植物物种多样性进行相关分析,发现种植不同的树种可以降低城市花粉致敏风险^[24,46]。同时,有研究指出提升环境生物及微生物多样性,有助于恢复人体免疫功能,进而降低花粉致敏现象^[9]。

表 1 与植物因素相关的研究
Table 1 Research related to plant factors

因素类型 Factor type	特征参数 Characteristic parameter	参考文献 References	因素类型 Factor type	特征参数 Characteristic parameter	参考文献 References
植物个体 Plant individual	花粉形态	[20—21]		花粉排放量	[20—21, 48—49]
	传粉类型	[10, 21, 26, 28]		交叉反应	[21, 30, 39, 41, 50]
	树木冠幅	[33—34, 47]		主要授粉期长度	[18, 20, 26, 30, 48—51]
	树木高度	[34, 47]	植物群落	植物密度	[10, 24]
	雄花形态	[20—21, 35—36]	Plant community	生物多样性	[26, 44]

1.2 环境因素对城市社区花粉致敏风险的影响

宏观的区域环境与城市环境作为自然基底,决定了社区环境的气候类型以及其中可以生长的植物种类。我国东南临海,属于海洋性气候,内地属于大陆性气候,植物品种大不相同。而平原地区适于植物生长,植物种类丰富;2000 m 以上植被减少,花粉量随之减少^[52]。

受区域与城市的自然环境和建成环境影响,城市社区环境通过影响花粉的产生与传播过程,从而影响环境致敏风险水平(表 2)。与农村中的自然环境不同,城市社区受建筑布局、不透水地面等因素影响,呈现通风不畅、污染物浓度高及热岛效应等微气候环境特征。类似的, Schweitzer 等通过对美国 80 个大都市城市形态和空气质量的研究,证实建成环境与空气颗粒物浓度存在重要关系^[53]。花粉作为空气颗粒物的重要种类,其相关实证研究尚有待加强。

1.2.1 城市社区通风影响花粉的传播

气传花粉依托空气进行传播,其传播范围受风速、风向等因素影响^[54]。孟龄等研究发现当风速小于 1 m/s 时候,花粉飘散受限;当风速在 1—3 m/s 时,花粉粒容易飘散,气传花粉含量较大;当风速超过 3 m/s 时,花粉扩散程度高,空气中花粉含量值反而较小^[55]。也有学者指出风向与大气污染物浓度的相关性显著高于风速^[56],背风侧浓度显著高于迎风侧^[57],而街谷与主风向平行或垂直均会使大气污染物浓度较高,呈 45°

或 135° 角时有利于大气污染物扩散^[56]。

城市社区通风主要受建筑群形成的风廊影响^[58],如图 2 所示。针对社区整体而言,Grimmond 使用 Raupach 模型建立的城市形态学模型来估算地表粗糙度,从而衡量通风潜力,社区天空开阔度与地面大气颗粒物浓度呈现较强的正相关性,且随着颗粒物粒径的增大,相关性增强^[56];具体到特定街谷内,不同街道高宽比(H/W)会形成不同的气流场,从而对花粉扩散产生不同影响:孤立粗糙流($H/W < 0.3$)、尾流干扰流($0.3 < H/W < 0.7$)、滑动流($H/W > 0.7$)^[59],深窄的街谷中形成稳定的气流循环,因而会降低内部通风能力与污染物的扩散水平^[60]。

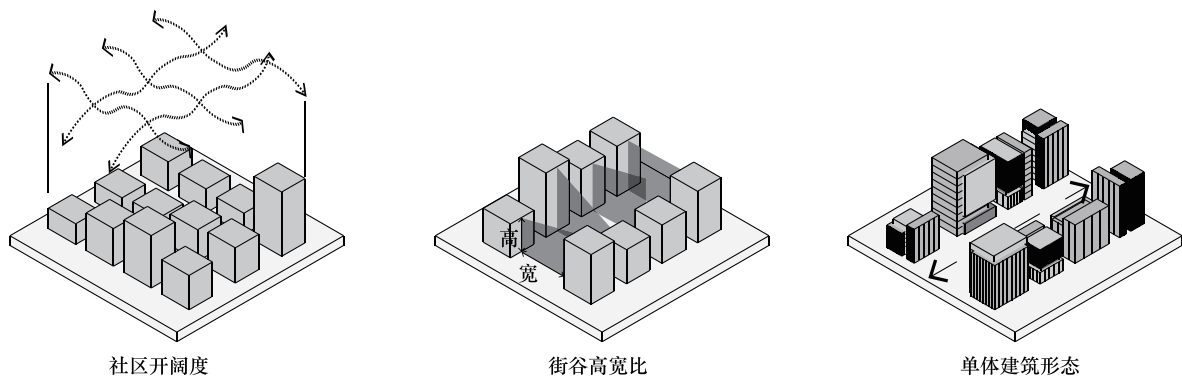


图 2 影响社区通风环境的空间形态要素

Fig.2 Factors affecting community ventilation environment

建筑单体会对空气流动产生屏障(图 3),阻碍花粉扩散进而提高特定区域花粉粒含量浓度^[11]。建筑迎风面受回流风影响形成小范围风速减弱区域,背风区受下沉气流影响,形成涡旋区和风速骤然减弱的风影区^[61],在空气污染物相关研究中称为下洗效应。建筑屋顶形态通过改变街谷对称性会对风场产生影响^[62],而整体建筑几何形态的多样性会增加空气对流,有利于大气污染物向上扩散^[63]。

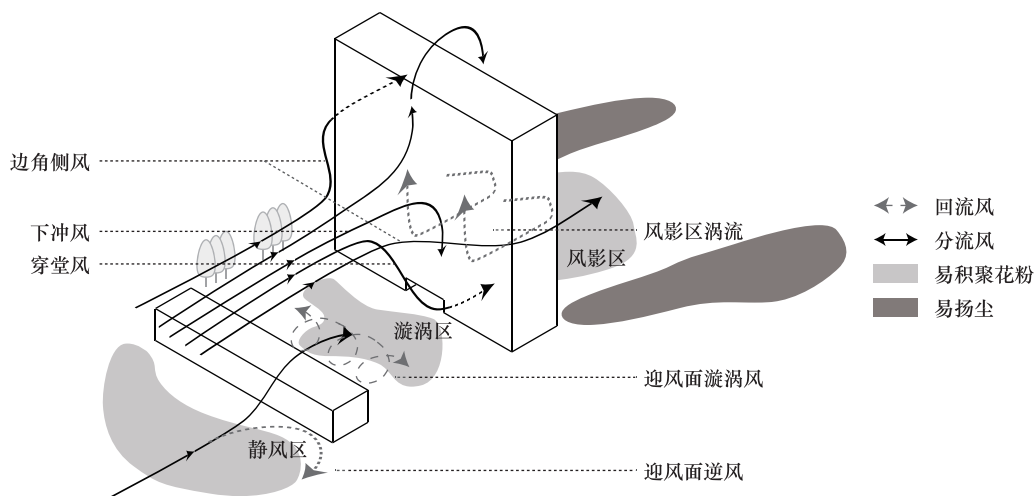


图 3 受建筑物影响的花粉扩散条件(改绘自参考文献^[17])

Fig.3 Pollen diffusion conditions affected by buildings

城市社区中绿化树种同样会对风的流动产生影响。树冠形状可以改变社区组团的涡流结构,生成复杂的细小湍流,改变社区建筑顶部空气交换速率,进而影响花粉粒的分布^[64]。树冠可能通过隔离冠层内部阻挡风的流动,同时也可能对树冠下的风向波动产生影响,产生湍流稀释花粉浓度^[54]。Zong 等分析成都青羊区的行

道树,提出行道树释放花粉对人类健康的不利影响与街道宽度呈负相关^[65];而行道树会引起宽街谷背风侧污染物浓度的增高,迎风侧浓度的降低,同时引起深窄街谷迎风侧和背风侧污染物浓度的增高^[34,66]。

现有研究中,针对建筑形态对花粉等颗粒物传播的影响指标通常聚焦于高宽比(H/W)、建筑高度(H)、天空开阔度(SVF)等单一指标,而社区尺度下影响通风环境的城市建筑格局包含建筑起伏度(LHR)、建筑体积(V)、建筑体形系数(BSC)等相关指标^[67],则尚未纳入考量。

1.2.2 城市社区温度影响花粉的产生与传播

大规模的城市化下,人类活动产生的热量释放及不透水地面对热量的积聚使得城市社区环境具有温度高于周围郊区的气候特征,即热岛效应^[68]。热岛效应使得一定空间范围内的温度上升从而增加空气中花粉浓度,并且导致花期提前,从而延长花粉季节及提高花粉致敏性^[69]。

全球变暖导致的气温上升与花粉释放量紧密相关。基于对西班牙某森林长达 22 年的花粉释放量跟踪研究结果,Cariñanos 等发现气温、降水与花粉释放量存在显著相关性。伦敦及斯德哥尔摩地区自 20 世纪中期开始,桦树花粉释放量随温度不断增加^[70]。同时,在近二十年间,英国、日本等世界多地出现了植物的花粉季节因气温上升和花期提前而显著延长的现象^[70-71]。

一年内温度逐月变化亦与花粉浓度相关。在全年气温变化过程中,日均温度在 0—15℃ 的区间内,花粉含量随温度的升高而升高^[55,69,72],在 18—30℃ 的范围内时,花粉含量随温度的升高而降低^[55,72];而相似的,相对湿度在 20%—50%或大于 70%的时候,气传花粉含量随相对湿度的增大而减小,而相对湿度在 50%—60%时,气传花粉含量随相对湿度的增大而增加。

温度通过影响花粉的产生和传播增强环境致敏风险。温度升高可诱导城市植物花粉中植物致病相关蛋白的更高表达^[73],在此基础上增加了城市季节性呼吸道过敏的趋势^[74]。而气温差异可使一株树南北两侧花粉蛋白致敏原表达不同从而使致敏性产生差异^[70]。高温引起的对流会促进花粉的传播^[75]。城市下垫面由工程材料构成,比热容小、渗透性差,使其温度显著高于裸土,易导致热力环流加剧,使花粉浓度区别于自然地面的 12:00—15:00 的“单峰型”变化,呈现 14:00 和 20:00 的“双峰型”的日变化特征,形成花粉浓度晚高峰^[76]。

1.2.3 社区空气质量影响花粉蛋白

工厂废气及汽车尾气中的污染物严重影响着城市社区空气质量,其同时会通过刺激花粉蛋白表达或与植物花粉结合,提高社区花粉致敏风险。

多项研究证实大气污染物与花粉致敏风险具有相关性。Markevych 等收集了 631 名儿童成长环境的空气污染物浓度,并与其 15 年内的花粉过敏反应进行相关性分析^[15],研究发现 NO_x 与 O_3 浓度导致花粉中的致敏原含量升高从而增加花粉的致敏性^[15,77]。废气中大量的固体废物作用于花粉粒表面,也会增加花粉症的影响^[74],Diaz-Sanchez 等在空气污染对花粉致敏性的研究当中发现,柴油燃烧后排放的颗粒物与豚草花粉相结合,能够更显著地增加豚草花粉的致敏强度^[78]。

空气污染物通过影响花粉蛋白性质使得致敏原增多,从而提高花粉致敏性。Okuyama 等通过对日本雪松花粉致敏性的研究发现,含有重金属、酸性物质的有毒污染物会吸附在花粉表面从而增强其致敏性,同时 NO_x 与花粉蛋白反应后,会显著增加酸性气体的吸附性,从而引发气道炎症^[79];Majd 等证实花粉暴露于污染物中,其抗原蛋白受污染物影响变性,会释放更多致敏原^[80]。Peltre 以实验表明,空气污染物更易使花粉外壁破碎,易暴露出花粉致敏原^[81]。空气污染物同样会影响人体呼吸道而增强花粉过敏反应。Obtulowicz 等研究得出空气污染物能通过依赖或不依赖于 IgE 抗体的机制增强呼吸道的反应性,通过刺激呼吸道和皮肤增强花粉进入人体的能力^[82]。

2 现有花粉致敏风险评估方法

社区尺度下的花粉致敏风险的影响机制评估可从“植物致敏风险评估”和“环境致敏风险评估”两个层面

展开。植物致敏风险评估是通过对花粉产生源头的植物致敏风险进行评估;环境致敏风险评估在此基础上进一步结合花粉传播的空间影响因素,分析评估环境对花粉致敏性的影响。

表 2 与环境因素相关的研究

Table 2 Research related to environmental factors

因素类型 Factor type	特征参数 Characteristic parameter	参考文献 References	因素类型 Factor type	特征参数 Characteristic parameter	参考文献 References
通风环境 Ventilation environment	环境风速	[55—56]	社区温度 Community temperature	热岛效应	[48,69—70,83]
	风向与街谷朝向	[56—57]		日平均温湿度	[55,69,72]
	社区开敞程度	[56,58]	污染浓度 Pollution concentration	环境温度	[70,73—76]
	街谷高宽比例	[58—60]		NO _x /O ₃ 浓度	[15,69,77,79,]
	单体建筑形态	[11,63]		固体颗粒物浓度	[74,78]
	绿化树种(行道树)	[65—66]			

2.1 植物花粉致敏风险评估方法

2.1.1 OPALS 奥格伦植物过敏量表评估法

Thomas Leo Ogren 于 2000 年创建了奥格伦植物过敏量表(The Ogren Plant Allergy Scale, OPALS)评估法,形成了第一份具有致敏等级的植物过敏量表。OPALS 基于 130 多个单独因素(并非所有因素都适用于每种植物),将 3000 种植物类群的致敏潜力划分为 10 个等级,致敏性最低的植物种类排名第 1,致敏性最高的植物排名第 10。除了花粉致敏性外,OPALS 还考虑了其他疾病风向因子,如刺激性香味、植物汁液毒性、皮疹、蜜蜂和黄蜂的吸引力等^[20]。但由于各因子的权重和过敏类别的计算方法仅部分公布,OPALS 的推广受到了一定限制。

2.1.2 VPA 潜在致敏性值评估法

Cariñanos 等人创建的潜在致敏性值(Value of Potential Allergenic, VPA)评估法在目前应用较为广泛,该方法采用综合授粉策略、主授粉期、花粉致敏潜力三个因子计算评估常见致敏物种的潜在致敏性值,并将植物划分为无致敏性、低致敏性、中致敏性、高致敏性、极高致敏性五个等级^[26]。

在此基础上,Cariñanos 等人将潜在过敏性值(VPA)应用于地中海常见过敏原植物的评估中^[24]。后鉴于各标准中一些物种的致敏性程度存在差异,Cariñanos 等人综合三个植物致敏性程度列表,通过检查地中海城市常见树木和灌木的潜在过敏性值(VPA),更新了一份关于地中海城市 150 种植物的致敏性程度列表^[19]。相较于 2014 年的评估方法,2021 年 Cariñanos 等人对花粉致敏潜力这一因子的数据来源进行提升,优先采用受学界广泛认可的数据库,如由世界卫生组织和国际免疫学会(WHO/IUIS)批准的过敏原命名数据库或 Allergome 数据库^[84]。国内学者姚亚男等人结合出现过敏反应的人数对式中致敏潜力因子进行了优化^[85]。

2.1.3 CARE-S 植物致敏风险程度评估法

2022 年,Magyar Donát 等通过回顾原有植物致敏性评估系统,利用植物的遗传决定因子:免疫原性、形态和花粉产量,开发了一种致敏植物分类系统 CARE-S(Categorization System for Regulation of Allergenic Plants by Strong Evidence),并已应用该系统对 529 个植物类群的致敏性进行评估,同时研发了在线计算器工具用于其他地理区域或新的植物品种致敏性评估^[21]。

CARE-S 首次引入免疫原性因子,并使用过敏原命名数据库和 Allergome 数据库等作为因子数据来源。其形态因子在传粉类型(风媒或虫媒)上增加了对花粉粒大小的考量。但是,CARE-S 缺乏其他社区植物花粉致敏影响因素的综合考虑,如花粉季节长度和植物种群大小等因素。

2.1.4 其他植物致敏风险程度评估法

除了上述三种常用植物致敏风险评估方法外,其他机构和学者也展开了丰富的探索(表 3)。Ivanovici 开发了一种针对特定区域的某些植被致敏风险的指数^[50]。Bergmann 等提出了一个包含 3 个致敏等级的评估方

表 3 植物花粉致敏风险评估方法^[24]
Table 3 Plant pollen-allergy risk assessment methods

作者/方法 Author/ Method	地区 Region	致敏分级 Grading	评估的 物种数 Number	评估方 法解释 Interpretation	评估中使用的因子 Factors in assessments							植物密度/ 丰度 Density/ Abundance (plant)	
					花粉形态 Pollen morphology	免疫原性 Immunogenicity	传粉类型 Type of pollination	雄花形态 Male flower morphology	花粉 排放量 Abundance (pollen)	生命周期 Life cycle	交叉反应 Cross reaction		主要授粉 期长度 Main pollen season
Ogren/OPALS	美国	10	>3000	无	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y
Hruska/AI	意大利	3	70	有	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y
Ianovici	罗马尼亚	4	23	有	N	N	N	N	N	N	Y	Y	N
Bergmann	德国	3	70	无	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cariñanos/VPA	西班牙	5	100	有	N	Y	Y	N	N	N	N	Y	N
Thibaudon 等	法国	3	50	无	N	N	N	N	N	N	N	Y	N
花粉图书馆	美国	4	>1200	无	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Magyar 等/CARE-S	全球	5	>520	有	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	N	N

OPALS: 奥格伦植物过敏量表 The Ogren Plant Allergy Scale; AI: 过敏原指数 Allergen index; VPA: 潜在致敏性 Value of potential allergenic; CARE-S: 基于有力证据的致敏植物调控分类系统 Categorization system for regulation of allergenic plants by strong evidence; Y: 评估方法中涉及此因子; N: 评估方法中未涉及此因子; -: 评估方法未提及此因子

法,以此来指导德国花粉症的预防工作^[86]。Thibaudon 等将法国常见城市植物划分为 3 个致敏等级^[51]; Pollenlibrary.com 网站在其数据库中包含 1200 多种植物物种,用户可以在其中搜索有关花粉过敏性的信息,不同的物种分为 3 类过敏原(轻度、中度和高度过敏)。

2.2 环境花粉致敏风险评估方法

基于植物花粉的致敏性研究提供了不同植物物种或植被间致敏风险强弱水平,但仍不能满足多种植物构成的绿地组团以及复杂多变的城市环境下致敏风险评估的需求^[21]。空间环境作为花粉传播的媒介对花粉致敏风险有着显著影响,引入植物关系因子与空间环境因子展开研究成为当前的趋势。

2.2.1 SAI 过敏原指数评估法

基于已有对意大利过敏植物的生物学与物候学特征的数据及花粉的过敏性特征,Hruska 开创性的提出了基于植被监测的过敏原指数(Allergen Index, AI)评估法,Ciferri 等在此基础上应用并改进为 SAI 指数(Specific Allergenic Index)^[87]。其根据植物的生命周期(Life Cycle, lc)、授粉周期(Phenanthestic Period, pp)、交叉反应(Cross Reactivity, cr)以及过敏植物丰度(Abundance, a)四个参数评估植物致敏性对人体的影响。公式如下:

$$SAI = \frac{\sum_{i=1}^n lc_i + pp_i + cr_i + a_i}{N} \quad (1)$$

式中, N 指物种数量; lc_i 指生命周期; pp_i 指授粉周期; cr_i 指交叉反应; a_i 指物种丰度;

SAI 评估法可对一个地区的潜在过敏性进行评估,并将结果划分为轻度、中度和强度三个等级。Hruska 用于评估意大利中部数个城市的生态系统的植被致敏风险,结果表明意大利城市生态系统的植物群具有很高的致敏性,且禾本科和菊科是主要致敏植物^[18]。Mrdan 等应用该指标来评估塞尔维亚诺维萨德学校校园致敏植物带来的风险,结果表明学校中的垂枝桦和二球悬铃木是主要致敏植物,学前班样地内的致敏植物物种数量占总树木种群的 30% 以上,部分小学致敏植物物种数量占比达 65% 以上^[88]。但由于 SAI 评估法在计算中仅考虑物种数量,未考虑植被的总体积,有学者认为此评估方法无法准确把握场地的植被分布与空间特征,其结果不属于绝对实际值,不同样地间不具有可比性^[89]。

2.2.2 I_{UGZA} 城市绿地潜在致敏性指数评估法

Cariñanos 等创建的城市绿地潜在致敏性指数(Urban Green Zone Allergenicity Index, I_{UGZA})评估法是应用较为广泛的一种评估方式。其基于团队针对植物提出的潜在过敏性值(VPA),进一步结合树木高度(H)、各物种的个体数(N)、每棵树所占的表面积(S)等参数,评估城市绿地致敏性程度,公式如下:

$$I_{UGZA} = \frac{1}{378ST} \sum_{i=1}^k N_i \times ap_i \times pe_i \times ppp_i \times S_i \times H_i \quad (2)$$

$$I_{UGZA} = \frac{1}{\max VPA \times S_T} \sum_{i=1}^k VPA \times S_i \times H_i \quad (3)$$

式中,378 为场源模型尺寸常数; k 指物种数量; N_i 指个体数; ap_i 指花粉致敏潜力; pe_i 指花粉传播方式; ppp_i 为花粉传播周期; H_i 指成熟树木能达到的最大高度; S_i 指树木覆盖面积; S_T 指调查绿地总面积; VPA 为每个物种的潜质致敏潜力。 I_{UGZA} 取值为 0—1,并取 $I_{UGZA} = 0.3$ 为足以在敏感人群种引发过敏症状的阈值^[25],当值在 0.3—0.5 之间时,环境致敏等级为中等,当取值在 0.5 以上时,环境中的致敏风险较高。

在实际应用中, I_{UGZA} 的评估主体从一处单一的公园绿地^[26]逐渐扩展到多个城市的多类型绿地^[24—25],为降低城市绿地的致敏风险提供了参考标准和指导。国内学者闫珂等改进这一指数并将其应用到校园的指数评估上,结果显示其所调查的绿地内种植低致敏性植物较多,且绿地整体的致敏潜力较低,但从分区来看时,部分区域具有高致敏潜力,同时距离致敏植物越近致敏影响越大,距离场源中心 1000m 时几乎没有致敏影响^[90]。Magyar 等在运用 I_{UGZA} 评估街道等线形场地时,则发现由于纳入计算的面积区域难以划定,其致敏风险难以进行评估^[91]。而 Maya-Manzano 等结合花粉浓度测量等方式,检验发现 I_{UGZA} 在城市尺度下不能真实反

映城市的花粉致敏风险,空气传播的花粉记录与树木的数量、树木与花粉捕捉器的距离、不同的传粉方式及风向有关,且距离致敏花粉来源的树木距离越近,致敏风险越大^[47]。

2.2.3 AIROT 观赏树木空气生物学风险指数评估法

Pecero-Casimiro 提出了观赏树木空气生物学风险指数 (Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees, AIROT) 评估法,该方法既考虑了花粉致敏植物丰度、树木成熟度等常见的植物致敏相关因子,也考虑了海拔高度、地理特征等地理因子,并基于 LiDAR 数据,使用 Kriging 创建了针对梧桐树这一树种的城市致敏风险地图^[22],如式(4)。为评估多个物种的致敏指数,Pecero-Casimiro 进一步增加了对植物花粉产量赋值的指数 α ,如式(5)。改进后的 AIROT 指数可以比较同科但不同种植物花粉致敏风险的全年规律性波动^[92]。

$$AIROT = \sum_{i=1}^n \frac{PD_i \times N_i \times M_i \times Sh_i \times H_i}{S_T} \quad (4)$$

$$AIROT = \sum_{i=1}^n \frac{PD_i \times (N_i \times \alpha_i) M_i \times Sh_i \times H_i}{S_T} \quad (5)$$

式中, PD_i 指潜在分散性(Potential Dispersability); N_i 指按距离计算的试样数量(Number of Specimens by Distance); α_i 指根据种类和用途的花粉产量; M_i 指每个树种的成熟度(Maturity Degree for Each Specimen); Sh_i 指高层建筑、狭窄街道和广场的发生率和存在率(Incidence and Presence of High Buildings, Narrow Streets and Squares); H_i 指海拔高度(Height above Sea Level); S_T 指城市总面积(Total Surface of The City); i 为考虑的每条街道。

AIROT 评估法是在城市尺度下评估花粉致敏风险,通过结合 LiDAR 等技术,将城市空间指标纳入评估,最终生成城市致敏风险地图,风险地图显示树种成熟度和花粉产量高的地方致敏风险高,且狭窄街道比开放空间的花粉致敏风险更高。AIROT 评估法增加了对于花粉空间扩散特性的考虑,是花粉致敏评估方法的一大进步。

2.2.4 环境花粉致敏风险评估方法小结

影响环境中花粉致敏风险的因素主要分为植物和环境两方面,因此在环境花粉致敏风险评估方法中,所涉及因子也可分为植物因子和环境因子两类。如下表4所示,目前常用的环境花粉致敏风险评估方法中,对于植物方面的考虑均较为全面,虽然所采用的具体因子不同,但都将植物个体因子及群落因子纳入计算。而目前环境花粉致敏风险评估方法对于环境方面的考虑仍有不足,如SAI过敏原指数评估法、 J_{UGZA} 城市绿地潜在致敏性指数及P花粉致敏危害潜力的计算中均未纳入环境因子,AIROT观赏树木大气生物学指数将城市空间形态纳入计算,结合城市环境生成城市致敏风险地图,但其研究尺度较大且精度有限,未能充分考虑城市中建筑环境所产生的复杂小气候对于花粉扩散所产生的影响。总体来看,宏观、中观尺度与微观尺度的环境花粉致敏风险评估所考虑的因素不同,社区尺度的评估要考虑社区植物群落配置及建筑环境小气候等因素,已有的评估方法是否适合社区尺度仍有待商榷。

3 总结及未来展望

花粉致敏性评估是预防花粉污染及其引发的各类过敏性疾病防控的关键环节之一,然而目前在不同研究视角下产生的一系列的花粉致敏性评估方法无法直接用于城市社区尺度。因此,未来在建立系统和准确的社区尺度下的评估方法时,需要建立统一标准的数据集,并综合考虑植物因子、社区环境因子和临床患病率等各类因子,还可利用可视化技术建立包含社区三维特征的模型来模拟社区花粉分布及扩散规律。探索与构建社区花粉致敏评估方法,开展针对性的社区花粉致敏风险研究,有助于降低社区花粉致病率,是未来提升居民健康水平的重要研究方向。

3.1 建立统一标准的社区常用植物的花粉致敏性数据集

国内外花粉致敏风险评估已经取得一定进展,但在植物花粉致敏风险数据来源方面仍然存在分歧和不足,学术界对花粉致敏性标准尚未达成共识。具体表现在当同一植物使用不同花粉数据集数据进行致敏风险评估时形成不同的结果如表5。

表 4 环境花粉致敏风险评估方法

Table 4 Environmental pollen-allergy risk assessment methods

作者/方法 Author/Method	Hruska/ <i>AI</i>	Cariñanos / <i>I_{UGZA}</i>	Pecero-Casimiro/ <i>AIROT</i>	张曼琳/ <i>P</i>
评估主体 Assessment subjects	学校	公园绿地	城市	城市
地区 Region	意大利	西班牙	西班牙	中国
致敏分级 Sensitization grading	3	5	—	4
植物因子 Plant factors	N	Y	Y	N
植物形态	N	Y	N	N
免疫原性	N	Y	N	N
传粉类型	N	Y	N	N
雄花形态	N	N	N	N
生命周期	Y	N	N	N
交叉反应	Y	N	N	N
主要授粉期	Y	Y	N	N
植物密度	N	N	Y	N
花粉丰度	Y	N	N	Y
环境因子 Environmental factors	N	N	Y	Y
潜在扩散潜力	N	N	Y	N
空间形态	N	N	Y	N
场地面积	N	N	Y	N
海拔高度	N	N	Y	N

AI: Allergen Index 过敏原指数; *I_{UGZA}*: Urban Green Zone Allergenicity Index 城市绿地潜在致敏性指数; *AIROT*: Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees 观赏树木空气生物学风险指数; *P*: 花粉浓度潜力值; Y: 评估方法中涉及此因子; N: 评估方法中未涉及此因子

表 5 花粉致敏性程度数据集

Table 5 Pollen allergenicity degree data set

数据集 Data set	作者 Author	适用地 Region	统计数量 Numbers	物种及其对应致敏性 Species and their corresponding allergenicity						
				马尼 拉草*	芒果*	白千层*	白桦#	纸桦 木#	狗尾 草**	黑松**
过敏原命名数据库 Allergen Nomenclature Database	WHO/IUIS 过敏原 命名小组委员会	全球	—	+	+	—	+	—	—	+
过敏原数据库 Allergome	Allergom 过敏数据 实验室	全球	1403 种	+	+	+	+	+	+	+
奥格伦植物过敏量表 OPALS	Ogren	美国	约 2000 种	中	中	高	高	高	高	中
花粉网 Pollen.com	IQVIA 医疗公司	美国	>1200 种	低	中	中	中	中	—	—
欧洲空气过敏原网络 European Aeroallergen Network	AZ 花粉研究有限 公司	欧洲	40 种	—	—	—	高	高	高	低
中国气传和致敏花粉 China Airborne and Allergenic Pollen	叶世泰等	中国	80+种	—	—	中	高	—	低	低
中国北方植物花粉调研花粉形态及花 粉过敏疑难病例 A study of plant pollen in northern China: pollen morphology and difficult cases of pollen allergy	王雪艳, 张罗	中国	456 种	—	—	—	—	—	+	+
城市空间的木本物种数据库 Citree	德雷斯頓工业大学	德国	>350 种	—	—	—	高	中	—	—
魁北克国家公共卫生花粉数据集 Institut national de santé publique du Québec	魁北克国家公共卫 生研究所	加拿大	31 种	—	—	—	+	+	+	—
意大利学会 空气生物学花粉数据集 Italian Society of Aerobiology, AIA	意大利空气生物学 协会	意大利	128 种	—	—	—	高	—	—	—
法国国家航空生物监测网络过敏植 物集 The National French Network of Aerobiological Monitoring, RNSA	法国空气生物学监 测网络	法国	75 种	—	—	—	高	高	高	—

标注“*”的植物为我国南方常见植物,标注“#”的植物为我国北方常见致敏植物,标注“*#”的植物为我国南北方常见致敏植物;“高”“中”“低”表示在对应数据集中该植物致敏,且其致敏等级为高、中或低;“+”表示在对应数据集中该植物被列为致敏植物,但未划定致敏等级;“—”表示在对应数据集中该植物未被列入致敏植物或未提及该植物

现有环境致敏评估方法多以植物致敏风险评估为基础,而花粉致敏性数据的一致性才能保证环境致敏性评估的客观性,这要求数据集涵盖较广泛地域的社区常用植物。基于遥感数据的数据标准化且容易获取,当前已有研究使用遥感技术结合人工神经网络建立花粉过敏监测模型^[93],在建立统一标准的社区常用植物的花粉致敏性数据集过程中,结合地理信息与大数据的交叉学科探究将是未来的重要发展方向。

3.2 完善社区花粉致敏风险评估因子

基于上文辨析,与社区花粉致敏风险具有较高相关性的因子主要有:植物个体因子、植物群落因子、社区通风、温湿度及空气质量等。大多数因子在相关研究中已被应用,但在不同的评估方法中所选用的指标不同,对于花粉致敏风险的评估方法还未形成规范。同时,评估方法中仍需加强对医学效应权重因子的考虑,并纳入社区植物群落因子、微气候因子,以形成更适合城市社区环境和居民特点的花粉致敏风险评估方法。

其一,增加植物群落因子的综合考虑。现有花粉致敏性评估方法对于植物因子的考虑集中在植物个体角度,较少将植物群落因子纳入评估计算中。社区植物群落通常是由不同植物种类构成的,不同种类的植物之间存在复杂的相互作用关系。Cariñanos 等研发的 I_{UGZA} 指数虽是对植物群体的考虑,但仅为植物个体间的简单相加,难以应对针对群落结构较为复杂的植物群落致敏风险评估。因此需要针对社区植物群落的复合特征如物种多样性等因子对现有评估方法进行补充修改,从而使其更好评估社区尺度下的致敏风险。

其二,增加对社区微气候因子的整体考虑。国内外花粉致敏评估方法中甚少考虑纳入通风、温度等微气候因子产生的影响,而在与花粉颗粒散播原理近似的大气污染物传播规律研究中,已证实社区微环境因子与其产生和传播具有强相关性。因此,在社区尺度对花粉致敏风险开展评估,应纳入对于微气候环境因子的考虑。同时,由于针对微气候环境因子对花粉浓度与致敏风险影响的研究以分别论述单一因子的作用为主^[48,58],而各个环境因子在社区中是共同存在且相互影响,需要对各种环境因子对花粉致敏风险的协同作用进行研究,如采用回归方程整体考虑城市社区中的温度、湿度、污染物等微气候因子花粉的产生和传播的影响^[94]。整体微环境和社区花粉致敏风险具有显著的相关性,因此在评估时需要增加城市社区整体微环境因子的考虑。

其三,纳入临床医学过敏患病率方面的因子。现有环境花粉致敏风险评估方法多基于植物学、环境学等学科的研究基础,聚焦于花粉本体的浓度等相关指标的研究,较少与临床医学等证据关联,缺少花粉致敏风险水平对人影响的实证。相比于单纯从植物学及环境学角度的设计管理,结合临床医学致敏性方面的证据可从城市居民角度了解花粉致病情况。应用花粉致敏性在临床医学方面的证据,如社区居民过敏患病率、抗过敏药物购买量等,结合花粉在空气中的浓度等证据能更够直接、清晰地表达与指示社区中的花粉致敏情况。因此,在对社区花粉致敏情况进行评估时,应增加社区居民的花粉过敏患病情况方面的证据。

3.3 加强花粉扩散模型研究

目前国内外花粉致敏风险评估方法主要为利用花粉释放量、花粉排放周期等因子进行定量评估。然而随着城市化进程,城市社区空间形态受到建筑与街道三维布局影响,城市下垫面及空间结构发生了很大的变化,导致城市花粉产生与散播的条件也发生了很大的变化。传统花粉致敏定量评估已不能满足当前城市花粉致敏风险研究的需要,包含社区三维特征的花粉传播扩散的模型模拟应成为探讨社区与花粉致敏关系的关键。

未来应加强以定点监测和模型模拟相结合的方法分析植物与社区环境复合作用下的社区花粉分布及其扩散规律,明晰影响社区花粉致敏风险的关键因子,结合花粉致敏临床医学的证据,进而提出有利于准确评估社区花粉致敏风险的评估方法。

参考文献 (References):

- [1] 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志编辑委员会鼻科组,中华医学会耳鼻咽喉头颈外科学分会鼻科学组. 中国变应性鼻炎诊断和治疗指南(2022年,修订版). 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2022, 57(2): 106-129.
- [2] Oh J W. Pollen Allergy in a Changing World: A Guide to Scientific Understanding and Clinical Practice. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.

- [3] 张曼琳, 潘妮, 赵娟娟, 李明娟, 江南. 城市花粉致敏植物种类构成、分布与潜在危害评估——以深圳市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 8746-8757.
- [4] 隋利萍, 李健, 李清华, 赵运华, 郑家华, 郭有新, 欧阳昱晖. 致敏花粉监测及浓度播报在花粉症防治中的作用. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2022, 29(10): 641-644.
- [5] Durham S. ABC of allergies, Summer hay fever. BMJ, 1998, 316(7134): 843-845.
- [6] Centers for Disease Control and Prevention. Allergens and Pollen Centers for Diseases Control and Prevention (2020-08-21) [2024-1-11]. <https://www.cdc.gov/climateandhealth/effects/allergen.htm>.
- [7] Gonzalo-Garijo M A, Tormo-Molina R, Muñoz-Rodríguez A F, Silva-Palacios I. Differences in the spatial distribution of airborne pollen concentrations at different urban locations within a city. Journal of Investigational Allergology & Clinical Immunology, 2006, 16(1): 37.
- [8] Bousquet J, Khaltaev N, Cruz A A, Denburg J, Fokkens W J, Togias A, Zuberbier T, Baena-Cagnani C E, Canonica G W, Van Weel C, Agache I, Ait-Khaled N, Bachert C, Blaiss M S, Bonini S, Boulet L P, Bousquet P J, Camargos P, Carlsen K H, Chen Y, Custovic A, Dahl R, Demoly P, Douagui H, Durham S R, Van Wijk R G, Kalayci O, Kaliner M A, Kim Y Y, Kowalski M L, Kuna P, Le L T, Lemiere C, Li J, Lockey R F, Mavale-Manuel S, Meltzer E O, Mohammad Y, Mullol J, Naclerio R, O'hehir R E, Ohta K, Ouedraogo S, Palkonen S, Papadopoulos N, Passalacqua G, Pawankar R, Popov T A, Rabe K F, Rosado-Pinto J, Scadding G K, Simons F E, Toskala E, Valovirta E, Van Cauwenberge P, Wang D Y, Wickman M, Yawn B P, Yorgancioglu A, Yusuf O M, Zar H, Annesi-Maesano I, Bateman E D, Ben Kheder A, Boakye D A, Bouchard J, Burney P, Busse W W, Chan-Yeung M, Chavannes N H, Chuchalin A, Dolen W K, Emuzyte R, Grouse L, Humbert M, Jackson C, Johnston S L, Keith P K, Kemp J P, Klossek J M, Larenas-Linnemann D, Lipworth B, Malo J L, Marshall G D, Nasipit C, Nekam K, Niggemann B, Nizankowska-Mogilnicka E, Okamoto Y, Orru M P, Potter P, Price D, Stoloff S W, Vandenplas O, Viegi G, Williams D, World Health O, Galen, Allergen. Allergic Rhinitis and its Impact on Asthma (ARIA) 2008 update (in collaboration with the World Health Organization, GA(2)LEN and AllerGen). Allergy, 2008, 63 Suppl 86: 8-160.
- [9] 龚惠莉, 翟俊. 生物多样性视角下的植物花粉致敏问题溯源及景观设计对策研究. 中国园林, 2022, 38(8): 111-116.
- [10] Cariñanos P, Casares-Porcel M. Urban green zones and related pollen allergy: a review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. Landscape and Urban Planning, 2011, 101(3): 205-214.
- [11] Carinanos P, Sánchez-Mesa J A, Prieto-Baena J C, Lopez A, Guerra F, Moreno C, Domínguez E, Galan C. Pollen allergy related to the area of residence in the city of Córdoba, south-west Spain. Journal of Environmental Monitoring, 2002, 4(5): 734-738.
- [12] 向明珠, 张国明, 孙煦然, 栾庆祖, 贺峰, 袁定清. 花粉过敏的环境因素. 环境卫生学杂志, 2022, 12(12): 903-908+914.
- [13] Gernes R, Brokamp C, Rice G E, Wright J M, Kondo M C, Michael Y L, Donovan G H, Gatzolis D, Bernstein D, Le Masters G K, Lockey J E, Khurana Hershey G K, Ryan P H. Using high-resolution residential greenspace measures in an urban environment to assess risks of allergy outcomes in children. Science of the total environment, 2019, 668: 760-767.
- [14] Stas M, Aerts R, Hendrickx M, Dendoncker N, Dujardin S, Linard C, Nawrot T S, Van Nieuwenhuysse A, Aerts J-M, Van Orshoven J, Somers B. Residential green space types, allergy symptoms and mental health in a cohort of tree pollen allergy patients. Landscape and Urban Planning, 2021, 210: 104070.
- [15] Markevych I, Ludwig R, Baumbach C, Standl M, Heinrich J, Herberth G, De Hoogh K, Pritsch K, Weikl F. Residing near allergenic trees can increase risk of allergies later in life: LISA Leipzig study. Environmental Research, 2020, 191: 110132.
- [16] Andrusaityte S, Grazuleviciene R, Kudzyte J, Bernotiene A, Dedele A, Nieuwenhuijsen M J. Associations between neighbourhood greenness and asthma in preschool children in Kaunas, Lithuania: a case-control study. BMJ Open, 2016, 6(4): e010341.
- [17] 颜文涛, 李子豪, 菅天语, 林峰田, 谢俊民. 空气环境健康导向下的老旧社区生态化更新:理论框架与案例实践. 城市发展研究, 2022, 29(1): 121-132.
- [18] Hruska K. Assessment of urban allergophytes using an allergen index. Aerobiologia, 2003, 19(2): 107-111.
- [19] Cariñanos P, Marinangeli F. An updated proposal of the Potential Allergenicity of 150 ornamental Trees and shrubs in Mediterranean Cities. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 63: 127218.
- [20] Ogren T L. Allergy-Free Gardening: The Revolutionary Guide to Healthy Landscaping Berkeley: Ten Speed Press, 2000.
- [21] Magyar D, Páldy A, Szigeti T, Orlóci L. A regulation-oriented approach for allergenicity categorization of plants. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 70: 127530.
- [22] Pecero-Casimiro R, Fernández-Rodríguez S, Tormo-Molina R, Monroy-Colín A, Silva-Palacios I, Cortés-Pérez J P, Gonzalo-Garijo Á, Maya-Manzano J M. Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees. Science of the total environment, 2019, 693: 133576.
- [23] Suanno C, Aloisi I, Parrotta L, Fernández-González D, Del Duca S. Allergenic risk assessment of urban parks: Towards a standard index. Environmental Research, 2021, 200: 111436.

- [24] Cariñanos P, Grilo F, Pinho P, Casares-Porcel M, Branquinho C, Acil N, Andreucci M B, Anjos A, Bianco P M, Brini S, Calaza-Martínez P, Calvo E, Carrari E, Castro J, Chiesura A, Correia O, Gonçalves A, Gonçalves P, Mexia T, Mirabile M, Paoletti E, Santos-Reis M, Semenzato P, Vilhar U. Estimation of the allergenic potential of urban trees and urban parks: towards the healthy design of urban green spaces of the future. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(8): 1357.
- [25] Cariñanos P, Casares-Porcel M, Díaz De La Guardia C, Aira M J, Belmonte J, Boi M, Elvira-Rendueles B, De Linares C, Fernández-Rodríguez S, Maya-Manzano J M, Pérez-Badía R, Rodríguez-De La Cruz D, Rodríguez-Rajo F J, Rojo-Úbeda J, Romero-Zarco C, Sánchez-Reyes E, Sánchez-Sánchez J, Tormo-Molina R, Vega Maray A M. Assessing allergenicity in urban parks: a nature-based solution to reduce the impact on public health. *Environmental Research*, 2017, 155: 219-227.
- [26] Cariñanos P, Casares-Porcel M, Quesada-Rubio J-M. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: a case-study in Granada, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 134-144.
- [27] 陈颖, 于森, 马嘉, 李运远. 典型浅街峡谷布局及其植物配置模式下的春季花粉飞散特征模拟研究. *生态学报*, 2024, 44(1): 1-15.
- [28] Cariñanos P, Adinolfi C, Diazdela Guardia C, De Linares C, Casares-Porcel M. Characterization of allergen emission sources in urban areas. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 244-252.
- [29] 李煜. 疾病预防视角下的当代健康社区设计理论初探. *住区*, 2016, (6): 28-33.
- [30] Vara A, Fernández-González M, Aira M, Rodríguez-Rajo F. Oleaceae cross-reactions as potential pollinosis cause in urban areas. *Science of the total environment*, 2016, 542(Pt A): 435-440.
- [31] 江伟明, 潘睿聪, 罗传秀, 林媚珍. 城市空气花粉的研究进展. *生态科学*, 2018, 37(6): 199-208.
- [32] Zhu C Y, Przybysz A, Chen Y R, Guo H J, Chen Y Y, Zeng Y Z. Effect of spatial heterogeneity of plant communities on air PM₁₀ and PM_{2.5} in an urban forest park in Wuhan, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 46: 126487.
- [33] Friedman J. The ecology and evolution of wind pollination. Toronto: University of Toronto, 2009.
- [34] 唐雨倩, 吴晓奕, 宗桦. 成都青羊区背街小巷行道树孢粉致敏风险分析. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1615-1621.
- [35] Van D A. Urban planning and respiratory health. *The Lancet Respiratory Medicine*, 2017, 5(10): 781-782.
- [36] Poland T M, McCullough D G. Emerald ash borer: invasion of the urban forest and the threat to north america's ash resource. *Journal of Forestry*, 2006, 104(3): 118-124.
- [37] Thompson J L, Thompson J E. The urban jungle and allergy. *Immunology and Allergy Clinics of North America*, 2003, 23(3): 371-387.
- [38] García-Mozo H, Galán C, Cariñanos P, Alcázar P, Méndez J, Vendrell M, Alba F, Sáenz C, Fernández D, Cabezero B, Vilches E D. Variations in the Quercus SP. pollen season at selected sites in Spain. *Polen*, 1999, 10: 59-69.
- [39] Weber R W. Patterns of pollen cross-allergenicity. *Journal of Allergy Clinical Immunology*, 2003, 112(2): 229-239.
- [40] 吴晓奕, 黄婉姣. 艾蒿花粉与豚草花粉的抗原成分分析. *广东医学*, 2004, 25(10): 1136-1138.
- [41] 邵洁, 罗海燕, A Purohit G, Pauli. 桦树花粉相关的食物过敏综合征一例. *中华儿科杂志*, 2005, 43(2): 149-150.
- [42] Chakraborty P, Chowdhury I, Gupta-Bhattacharya S, Roy I, Chatterjee S, Chanda S. Aerobiologic and immunochemical studies on *Borassus flabellifer* pollen: evidence for a 90-kD allergen. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 1998, 80(4): 311-317.
- [43] 吴晓奕, 黄婉姣, 宗桦, 唐雨倩. 成都市人民公园树木花粉致敏风险研究. *中国城市林业*, 2023, 21(3): 17-23.
- [44] Xu J-X, Zhang D-S, Li L H. Seasonal variations of airborne pollen in Beijing, China and their relationships with meteorological factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 202-208.
- [45] 肖兰, 王晨钰, 宋天园, 马云飞, 刘博, 岳丽君, 唐丽. 城市绿地花粉暴露特征与致敏风险评估研究进展. *中国城市林业*, 2022, 20(6): 159-167.
- [46] Sousa-Silva R, Smargiassi A, Kneeshaw D, Dupras J, Zinszer K, Paquette A. Strong variations in urban allergenicity riskscapes due to poor knowledge of tree pollen allergenic potential. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 10196.
- [47] Maya-Manzano J M, Fernández-Rodríguez S, Monroy-Colín A, Silva-Palacios I, Tormo-Molina R, Gonzalo-Garijo Á. Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 352-362.
- [48] 辛嘉楠, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 城市中的花粉致敏植物及其影响因素. *生态学报*, 2007, (9): 3820-3827.
- [49] 李全生, 江盛学, 李欣泽, 朱晓明, 魏庆宇. 中国气传致敏花粉的季节和地理播散规律. *解放军医学杂志*, 2017, 42(11): 951-955.
- [50] Ianovici N. Aerobiological monitoring of allergenic flora in Timisoara. *Lucrări științifice, Seria Horticultură*, 2008, 51: 131-136.
- [51] Thibaudon M, Monnier S, Sindt C, Oliver G. Pollen allergy potency for the main urban plants. *Scientific Advisor, Le Réseau National de Surveillance Aérobiologique. European Medical Journal Allergy Immunology*, 2017, 2.
- [52] 中国气传致敏花粉调查领导小组. 中国气传致敏花粉调查. 北京: 北京出版社, 1991.
- [53] Schweitzer L, Zhou J P. Neighborhood air quality, respiratory health, and vulnerable populations in compact and sprawled regions. *Journal of the*

- American Planning Association, 2010, 76(3): 363-371.
- [54] 苗纯萍, 何欢, 陈玮, 胡远满, 刘森. 城市绿地-三维建筑格局对大气污染物的影响研究进展. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1628-1634.
- [55] 孟龄, 王效科, 欧阳志云, 任玉芬, 王巧环. 北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系. 环境科学, 2016, 37(2): 452-458.
- [56] Miao C P, Yu S, Hu Y M, Bu R C, Qi L, He X Y, Chen W. How the morphology of urban street canyons affects suspended particulate matter concentration at the pedestrian level: an in-situ investigation. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102042.
- [57] Hang J, Lin M, Wong D C, Wang X M, Wang B M, Buccolieri R. On the influence of viaduct and ground heating on pollutant dispersion in 2D street canyons and toward single-sided ventilated buildings. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, 7(5): 817-832.
- [58] 高海宁, 李元征, 韩风森, 马倩, 刘雅莉, 胡聃. 城市街道峡谷通风与空气污染研究进展. 世界科技研究与发展, 2017, 39(4): 363-371.
- [59] Nakamura Y, Oke T R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, 1988, 22(12): 2691-2700.
- [60] Huang Y H, Lei C W, Liu C H, Perez P, Forehead H, Kong S F, Zhou J L. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons. *Environmental Pollution*, 2021, 280: 116971.
- [61] Yang J Y, Shi B X, Shi Y, Marvin S, Zheng Y, Xia G Y. Air pollution dispersal in high density urban areas: research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 54: 101941.
- [62] Huang Y D, Long C, Deng J T, Kim C N. Impacts of upstream building width and upwind building arrangements on airflow and pollutant dispersion in a street canyon. *Environmental Forensics*, 2014, 15(1): 25-36.
- [63] Kwak K H, Baik J J, Ryu Y H, Lee S H. Urban air quality simulation in a high-rise building area using a CFD model coupled with mesoscale meteorological and chemistry-transport models. *Atmospheric Environment*, 2015, 100: 167-177.
- [64] 周姝雯, 唐荣莉, 张育新, 马克明. 城市街道空气污染物扩散模型综述. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1039-1048.
- [65] Zong H, Yao M Q, Tang Y Q, Chen H. Assessing the composition, diversity, and allergenic risk of street trees in Qingyang District of Chengdu City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54: 126747.
- [66] Abhijith K V, Gokhale S. Passive control potentials of trees and on-street parked cars in reduction of air pollution exposure in urban street canyons. *Environmental Pollution*, 2015, 204: 99-108.
- [67] 陈石, 袁敬诚, 张伶伶. 城市设计视角下空间肌理形态控制的方法探索. 华中建筑, 2022, 40(2): 113-117.
- [68] Oke T R, Johnson G T, Steyn D G, Watson I D. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night part 2: diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, 56(4): 339-358.
- [69] 刘宜纲, 吕世华, 刘建忠, 刘文军, 黄开龙, 张嘉仪, 欧阳显辉, 李瑛. 2012—2016 年海淀区气传花粉物候特征及其与气象要素的关系. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3563-3571.
- [70] Beggs P J. Impacts of climate change on aeroallergens: past and future. *Clinical and Experimental Allergy: Journal of the British Society for Allergy and Clinical Immunology*, 2004, 34(10): 1507-1513.
- [71] Ishizaki T, Koizumi K, Ikemori R, Ishiyama Y, Kushibiki E. Studies of prevalence of Japanese cedar pollinosis among the residents in a densely cultivated area. *Annals of allergy*, 1987, 58(4): 265-270.
- [72] 张雨辰, 马春梅, 方伊曼. 大气花粉监测与传播研究进展. 微体古生物学报, 2018, 35(2): 200-210.
- [73] Rodríguez-Rajo F J, Jato V, González-Parrado Z, Elvira-Rendueles B, Moreno-Grau S, Vega-Maray A, Fernández-González D, Asturias J A, Suárez-Cervera M. The combination of airborne pollen and allergen quantification to reliably assess the real pollinosis risk in different bioclimatic areas. *Aerobiologia*, 2011, 27(1): 1-12.
- [74] D'Amato G. Urban air pollution and respiratory allergy. *Monaldi Archives for Chest Disease = Archivio Monaldi Per Le Malattie Del Torace*, 2002, 57(2): 136-140.
- [75] Norris-Hill J, Emberlin J. Diurnal variation of pollen concentration in the air of north-central london. *Grana*, 1991, 30(1): 229-234.
- [76] 郅光发, 杨颖, 王成, 牟少华. 软质与硬质地表对树木花粉日飘散变化的影响. 生态学报, 2010, 30(15): 3974-3981.
- [77] Riediker M, Monn C, Koller T, Stahel W A, Wüthrich B. Air pollutants enhance rhinoconjunctivitis symptoms in pollen-allergic individuals. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 2001, 87(4): 311-318.
- [78] Diaz-Sanchez D, Tsien A, Fleming J, Saxon A. Combined diesel exhaust particulate and ragweed allergen challenge markedly enhances human in vivo nasal ragweed-specific IgE and skews cytokine production to a T helper cell 2-type pattern. *Journal of Immunology*, 1997, 158(5): 2406-2413.
- [79] Okuyama Y, Matsumoto K, Okochi H, Igawa M. Adsorption of air pollutants on the grain surface of Japanese cedar pollen. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(2): 253-260.
- [80] Majd A, Chehregani A, Moin M, Gholami M, Kohno S, Nabe T, Shariatzade M A. The effects of air pollution on structures, proteins and allergenicity of pollen grains. *Aerobiologia*, 2004, 20: 111-118.

- [81] Peltre G. Inter-relationship between allergenic pollens and air pollution. *Allergie et Immunologie*, 1998, 30(10): 324-326.
- [82] Obtulowicz K. Air pollution and pollen allergy. *Folia Medica Cracoviensia*, 1993, 34(1/2/3/4): 121-128.
- [83] Cariñanos P, Casares-Porcel M, De La Guardia A V D, La Cruz-Márquez R D, De La Guardia C D. Charting trends in the evolution of the La Alhambra forest (Granada, Spain) through analysis of pollen-emission dynamics over time. *Climatic Change*, 2016, 135(3-4): 453-466.
- [84] Pomés A, Davies J M, Gadermaier G, Hilger C, Holzhauser T, Lidholm J, Lopata A L, Mueller G A, Nandy A, Radauer C. WHO/IUIS Allergen Nomenclature: Providing a common language. *Molecular immunology*, 2018, 100: 3-13.
- [85] 姚亚男, 李树华, 王玥, 金洋, 王羽. 中国花粉致敏树种分级研究. *中国园林*, 2023, 39(6): 114-119.
- [86] Bergmann K-C, Zuberbier T, Augustin J, Mücke H-G, Straff W. Climate change and pollen allergy: cities and municipalities should take people suffering from pollen allergy into account when planting in public spaces. *Allergo J*, 2012, 21(2): 103-107.
- [87] Ciferri E, Torrisi M, Staffolani L, Hruska K. Ecological study of the urban allergenic flora of central Italy. *Journal of Mediterranean Ecology*, 2006, 7(1/4): 15.
- [88] Mrđan S, Ljubojević M, Orlović S, Čukanović J, Dulić J. Poisonous and allergenic plant species in preschool's and primary school's yards in the city of Novi Sad. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 25: 112-119.
- [89] Suanno C, Aloisi I, Fernández-González D, Del Duca S. Monitoring techniques for pollen allergy risk assessment. *Environmental Research*, 2021, 197: 111109.
- [90] 闫珂, 杨华, 李文芳, 李云. 城市绿地致敏指数的改进研究及应用. *北京林业大学学报*, 2020, 42(5): 96-105.
- [91] Magyar D, Páldy A, Szigeti T, Szilágyi A, Orlóci L. A potenciális allergenitás felhasználási lehetősége a zöldterületek minősítésében és az allergén terhelés szabályozásában = The Application of Potential Allergenicity in the Evaluation of Urban Green Spaces and Regulation of Allergen Exposure. *Egészségtudomány*, 2020, 64(4): 57-80.
- [92] Pecero-Casimiro R, Fernández-Rodríguez S, Tormo-Molina R, Silva-Palacios I, Gonzalo-Garijo Á, Monroy-Colín A, Coloma J F, Maya-Manzano J M. Producing urban aerobiological risk map for cupressaceae family in the SW iberian peninsula from LiDAR technology. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1562.
- [93] 刘宇通, 王汶. 结合百度指数和遥感数据的花粉过敏研究. *遥感信息*, 2021, 36(6): 113-119.
- [94] 魏建苏, 刘梅, 顾亚进, 张军, 张静. 南京市花粉浓度变化规律及预报方法研究. *安徽农业科学*, 2008, (22): 9368-9371.